

## Analysis of Global Oscillation via Sync Search in Power Systems

심관식\* · 남해곤\*\* · 김용구\*\*\* · 문영환§ · 김상태†

(Kwan-Shik Shim · Hae-Kon Nam · Yong-Gu Kim · Young-Hoan Moon · Sang-Tae Kim)

**Abstract** - The present study explained the phenomenon that low frequency oscillation is synchronized with discrete data obtained from a wide area system, and a sync search method. When a disturbance occurs in an power system, various controllers operate in order to maintain synchronization. If the system's damping is poor, low frequency oscillations continue for a long time and the oscillations are synchronized with one another at specific frequency.

The present study estimated dominant modes, magnitude and phase of signals by applying parameter estimation methods to discrete signals obtained from an power system, and performed sync search among wide area signals by comparing the estimated data. Sync search was performed by selecting those with the same frequency and damping constant from dominant oscillation modes included in a large number of signals, and comparing their magnitude and phase. In addition, we defined sync indexes in order to indicate the degree of sync between areas in a wide area system. Furthermore, we proposed a wide area sync search method by normalizing mode magnitude in discrete data obtained from critical generator of the wide area.

By applying the sync search method and sync indexes proposed in this study to two area systems, we demonstrated that sync scanning can be performed for discrete signals obtained from power systems.

**Key Words** : Power system, Global oscillation, Discrete signal, Sync, Sync index, Parameter

### 1. 서론

발전기와 다양한 기기들로 구성된 전력계통에서 기기들은 동일한 주파수로 동기 되어 운전된다. 동기 된 발전기들은 그 설정치에 따라서 전력을 생산하여 부하에 전력을 공급한다. 전력계통에서 발전기와 부하들은 네트워크를 통하여 상호 병렬 연결되어 있다. 만일 한 발전기가 동기속도를 이탈하여 운전하면, 이때 발생하는 전력 변화는 다른 발전기들에 전달된다. 동시에 각 발전기의 회전자 속도가 변화하고, 터빈, 여자기등과 같은 제어기들의 적절한 제어 동작으로 발전기는 동기속도로 운전된다.

대부분 발전기에는 전기적인 진동을 감쇠시키기 위하여 제동권선이 삽입되어 있고, 발전기 회전속도를 일정하게 유지하기 위하여 자동적으로 터빈을 조절하는 조속기 계통을 가지고 있다. 또한 발전기 단자 전압을 일정하게 유지하기 위한 여자시스템을 가지고 있는데, 이와 같은 제어기는 소비

자에게 양질의 전력을 공급하고 안정하게 전력계통을 운용하기 위해서 필수적인 기기들이다. 그러나 부적당한 제어기 설정이나 네트워크 상태에 따라서 저주파수의 진동이 발생될 수 있다[1,2].

동조는 두 가지 사건이 일정기간 이상 지속해서 동시에 일어나는 현상으로 문헌 [3-4]에서는 수학적인 동조 정의와 생물과 무생물에서 일어나는 다양한 동조현상에 대해서 기술하고 있다. 문헌 [5]에서는 coupled 동적시스템이나 좁은 세상 네트워크(small world network)와 같은 복잡네트워크계에서 발생하는 동조 대해서 기술하고 있다. 그리고 문헌 [6]에서는 기본적인 전기회로에서의 전압과 전류사이에 동조현상을 규명하고, 직렬회로와 병렬회로의 동조현상으로부터 전력계통의 동조현상을 해석하고 있다.

최근 전력계통에서는 안전운용과 안전성확보를 위하여 기존 전력기술과 빠르게 발달하고 있는 통신네트워크기술을 접목하기 위한 다양한 노력을 시도하고 있다. 가장 활발한 분야로 중에 하나로 광역감시시스템(WAMS, Wide-Area Monitoring System)이 있는데, 이것은 실시간으로 시간동기된 신호를 취득하고 위상동기기술(Synchro-Phasor Technology)을 적용하여 광역계통을 감시하고 제어하는 기술을 포함하고 있다[7]. 취득한 광역 데이터에서 계통운용 필요한 유용한 정보를 얻기 위해서는 비선형 동적시스템과 이산신호처리에 대한 충분한 이해가 필요하고, 또한 이산신호를 이용한 새로운 광역 해석법이 요구되고 있다.

† 교신저자, 정희원 : 한전KDN 전력IT연구원 선임연구원

E-mail : jesteka@kdn.com

\* 정희원 : 전남대 공업기술연구소 선임연구원

\*\* 시니어회원 : 전남대 공대 전기공학과 교수

\*\*\* 정희원 : 한국폴리텍 V대학 전기계측제어과 조교수

§ 시니어회원 : 한국전기연구원 SmartGrid 센터 센터장

접수일자 : 2009년 2월 18일

최종완료 : 2009년 6월 8일

이 논문에서는 광역 계통에서 취득한 이산데이터로부터 계통에서 발생하는 저주파 진동이 동조되는 현상과 탐색 방법에 대해서 기술하고 있다. 먼저 동조를 정의하고, 계통의 저주파수 대역에서 발생하는 저주파 진동과 동조 사이에 관계를 기술하고 있다. 정상 운전되고 있는 전력계통에서 발생하는 저주파 진동은 일정한 제동비와 시정수로 감쇠하므로 발전기 출력 신호는 여러 개의 감쇠지수코사인함수의 합으로 표현될 수 있다. 따라서 파라미터 추정방법을 적용하여 시계열데이터에 포함된 중요 모드를 추정할 수 있고, 이들을 비교하여 출력 신호들 사이에 동조를 탐색할 수 있다. 다수의 신호에 포함된 중요 진동모드에서 동일한 주파수와 제동계수를 갖는 동일한 모드를 선택하고, 이들의 크기와 위상을 비교함으로써 동조를 탐색할 수 있다.

실 계통의 모든 발전기에서 시간동기 된 실측 신호를 취득하기 어렵기 때문에 동시성을 요구하는 광역계통의 동조를 탐색하기 어렵다. 이 논문에서는 이를 극복하기 위하여 모드크기를 정규화 해서 광역 계통의 동조를 근사적으로 계산할 수 있는 방법을 제안하고 있다.

동일한 특성을 갖는 신호의 동조를 파악함으로써 발전기나 부하를 특성에 따라서 구분할 수 있고, 각각의 신호에 대한 저주파진동을 하나의 진동으로 고려할 수 있는 광역진동(global oscillation)을 파악할 수 있다.

이 논문의 제 2장에서는 동적계통에서 동조를 기술하고 있고, 제 3장에서는 계통에서 취득한 이산신호의 동조 탐색 방법을 기술하고 있다. 그리고 제 4장에서는 사례연구를 통하여 제안한 동조 탐색을 검증하고 제 5장에 그 결과를 기술하였다.

## II. 동적계통에서 동조

다양한 전력기기와 제어기들로 구성된 전력계통에서 동기(synchronization)는 발전기를 비롯한 전체 계통에 포함된 모든 기기들이 동일한 주파수에서 운전되는 것을 의미한다. 그러므로 계통 운전에서 동기는 주파수 크기가 가장 중요한 요소이다. 이 장에서는 동기와 유사한 특성을 가진 동조(sync)에 대해서 기술하고 있는데, 지금까지 전력계통에서 널리 사용된 “동기”와 구분하기 위해서 “동조”라는 용어를 사용한다. 주파수의 크기만 고려하는 동기와 달리 동조는 주파수뿐만 아니라 주파수와 제동계수로 구성된 모드와 그 위상도 중요한 요소로 고려한다. 그러므로 전력계통에서 동기는 상용주파수 60Hz가 주요 관심 주파수인 반면, 동조는 모드와 위상을 고려할 수 있는 2Hz 이하의 저주파수가 주요 관심 주파수가 된다.

동적계통에서 이상적인 동조는 스스로 진동을 발생할 수 있는 2개 이상의 진동자들이 있어야 하며, 각각의 진동들의 크기가 동일해서 위상이 계통의 특성을 지배할 수 있게 그림 1과 같이 서로 연결되어 있어야 한다. 또한 실측한 이산신호들 사이에 동조를 탐색하기 위해서는 위상을 비교해야 하므로 시간동기(time-sync) 된 이산데이터를 취득해야 한다.

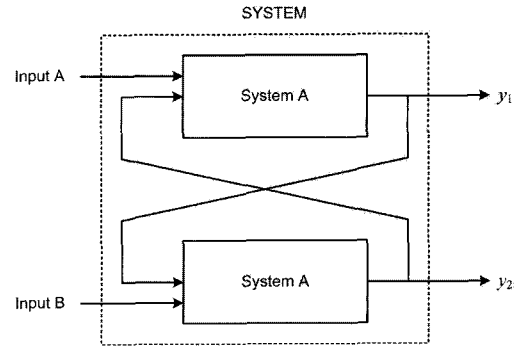


그림 1 시스템과 신호의 동조  
Fig. 1 System and Sync of signal

이 논문에서는 외란이 발생한 후 일정 시간동안 진동이 지속되고, 시스템 내에 동일한 특성을 가진 진동자가 다수 존재한다고 가정하고 동조를 정의한다. 다변수 시스템에서 동일한 특성을 가진 신호들이 동일한 주파수에서 진동하고, 그 신호들의 위상이 같거나 반대일 때, 신호들은 서로 동조하고 있다. 그림 1과 같이 입출력이 서로 영향을 주고 있는 동적계통에서 측정된 두 신호가 그림 2와 같다고 하자. 동일한 특성을 가진 두 신호  $y_1, y_2$ 가 동시에 발생할 때, 동일한 진동 모드에서 동조는 정의될 수 있다.

동적계통에서 측정된 신호는 감쇠지수함수와 코사인함수의 곱으로 이루어진 지수감쇠코사인함수들의 합으로 표현될 수 있다. 만일 임의의 이산신호가  $n$ 개의 지수감쇠코사인함수로 표현될 때,  $i$ 번째 함수의 크기와 제동계수를 각각  $A_i, \alpha_i$ 라 하자. 그리고 코사인함수의 주파수와 위상을  $\omega_i, \phi_i$ 라 하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_t = \sum_{i=1}^p A_i e^{\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

이 식에서 중요 모드에 관련된 파라미터들 사이에 관계를 단순화하기 위해서 복소모드  $z_i$ 로 표현하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_t = \sum_{i=1}^q B_i z_i^t, \quad B_i = \frac{1}{2} A_i e^{j\phi_i} \quad (2)$$

만일 신호의 모드 중에서  $k$ 번째 모드에 대응하는 크기  $A_k$ 가 가장 크고, 제동계수가  $\alpha_k$ 가 작아서  $k$  번째 모드가 신호의 중요 모드라면 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$y_t = B_k z_k^t \quad (3)$$

어떤 시스템에서 동일한 모드를 가진 다수의 신호들이 존재할 때, 모드 위상으로 신호들을 구분할 수 있다. 그림 2에는 두 개의 신호가 위상차에 따라서 나누어진 경우를 나타내고 있는데, 문헌 [7]에서는 그림 2(a)와 같이 두 신호의 위상차  $\phi_1 - \phi_2$ 가  $180^\circ$ 인 경우 -sync, 그림 2(b)와 같이 위상차가  $0^\circ$ 인 경우에는 +sync로 정의하고 있다.

일반적으로 동조는 크기와 주파수를 중요한 변수로 취급하고 있고, 위상은 항상 동일한 경우로 가정한다. 그러나 복잡한 동적계통에서 안정도를 고려할 때, 주파수, 위상뿐만 아니라 제동계수와 크기도 중요한 요소이다. 따라서 동적계통에서 동조를 취급할 때는 주파수와 제동계수 그리고 이에 대응하는 모드의 크기와 위상을 동시에 고려해야 한다.

많은 신호들에서 중요 모드와 그 모드에 대응하는 크기와 위상을 계산하면, 신호들 사이에 동조 관계를 정량적으로 파악할 수 있다. 대규모 전력계통은 발전기를 비롯한 다양한 전력기기와 전동기 같은 유도성 부하를 비롯한 다양한 종류의 부하로 구성되어 있다. 외란에 따른 계통의 동기를 유지하기 위해서 다양한 제어기들이 동작하고 이 과정에서 저주파수 진동이 발생한다. 이 현상은 계통이 동기되는 과정에서 발생하는 동조로 지금까지 밝혀진 동조 속에 동조(sync in sync)의 유일한 사례이다.

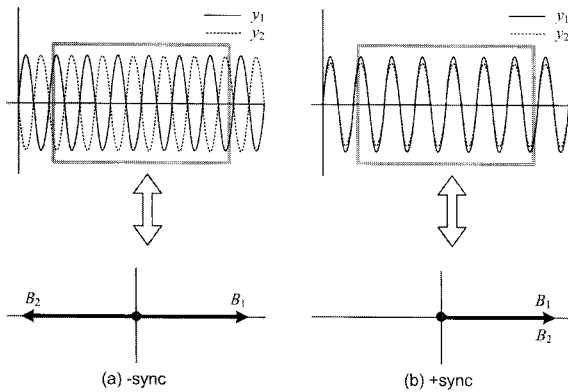


그림 2 신호에서 동조의 정의  
Fig. 2 Definition of Sync in signal

### III. 동조 탐색

이산신호에서 동조를 탐색하기 위해서는 동일한 시간에 신호들을 취득하여야 한다. 최근 전력계통에서 PMU(phase measurement unit)[8], iPIU(intelligent power information unit)[9-10]와 같은 위상동기측정 장치들에 대한 개발이 활발하게 진행되고 있고, 현재 기술적으로 밀리초 단위의 정확도로 시간동기된 광역신호를 취득할 수 있다.

시간동기된 이산데이터에서 동조를 탐색하기 위해서 가장 먼저 신호들에 포함된 파라미터를 찾아야 한다. 전 절에서 정의한 것과 같이 추정해야 할 파라미터들로 주파수와 제동계수 그리고 크기와 위상이 있다. 이 논문에서는 Prony 법[11-12]을 적용하여 파라미터를 추정하였는데, 신호의 파라미터 추정은 이 논문의 주제에서 벗어나므로 상세한 기술은 생략한다.

#### 3.1. 동조 지표

다수의 시간동기된 신호에서 중요 파라미터를 추정한 후, 신호들 사이에 동조를 파악하기 위해서는 동조 정도를 나타내는 정량적인 지표가 필요하다. 추정된 파라미터에서 다수의 동일한 모드가 계산되었다면, 각 모드의 위상으로 신호들을 두 그룹으로 분리할 수 있다. 이 논문에서는 편의상

두 그룹을 각각 L, R로 표현한다.

그룹 L에 포함된 모드 크기를  $B_L$ 라 하고, 그룹 R에 포함된 모드 크기를  $B_R$ 라 하면, 모드들의 합  $B_L$ 과  $B_R$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_L = \sum_{i=1}^m B_i = |B_L| \angle \phi_L \quad (4)$$

$$B_R = \sum_{j=1}^n B_j = |B_R| \angle \phi_R \quad (5)$$

여기서  $m$ 과  $n$ 은 두 그룹으로 분리된 모드들의 개수이다. 두 값 중에서  $B_L$ 이  $B_R$ 보다 크다고 가정할 때, 동조지표(sync index)를 다음과 같이 정의한다.

$$S = \frac{B_R}{B_L} = |S| \angle \phi \quad (6)$$

여기서 동조지표의 크기를 나타내는  $|S|$ 를 크기동조지표(magnitude sync index)라 하고, 위상을 나타내는  $\phi$ 를 위상동조지표(phase sync index)라 한다.

크기동조지표  $|S|$ 는 동조된 신호들 사이에 비중을 나타낸다. 만일  $|S|$ 가 1에 근접하면, 두 신호 그룹의 모드크기 벡터 합이 비슷하므로 전체 진동에 비슷하게 참여하고 있다. 위상동조지표  $\phi$ 는 신호들 사이에 동조된 상태를 나타내고 있다. 위상동조지표  $\phi$ 가  $0^\circ$ 에 근접하면, 두 신호 그룹은 +sync로 진동하고 있고, 위상동조지표가  $180^\circ$ 에 근접하면, 신호들은 -sync로 진동하고 있음을 나타내고 있다. 크기동조지표  $|S|$ 가 영(zero)에 근접할 때, 한 그룹 신호가 전체 계통의 진동을 지배한다. 이와 같은 경우는 광역진동에 해당하는 경우가 아니므로 위상동조지표는 큰 의미가 없다.

임의의 동적계통에 외란이 발생하였을 때, 특정 모드에 대한 동조지표로부터 광역진동을 파악할 수 있다. 특정 모드에 대응하는 모드 크기가 다른 모드 크기보다 훨씬 큰 값을 가지고 있으면, 특정 모드가 광역진동(global oscillation)을 지배하고 있다. 특정 모드의 주파수를  $\omega_i$ 라하고, 제동계수를  $\alpha_i$ 라 하자. 만일  $\phi_L > \phi_R$ 이면, 특정모드에 대한 광역진동  $y_g$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_g = \Delta B z_i^t, \quad \Delta B = B_L - B_R \quad (7)$$

그룹 신호의 모드크기가  $|B_L| = |B_R|$ 이고, 위상  $\phi$ 가  $180^\circ$ 에 근접하면,  $\Delta B$ 는 최소가 되고, 위상  $\phi$ 가  $0^\circ$ 에 근접하면,  $\Delta B$ 는 최대가 된다. 즉 특정 모드에서 동조가 -sync일 때, 광역진동은 최소가 되고, +sync일 때, 최대가 된다. 따라서 계통 안정도 측면에서 +sync일 때, 안정도 여유가 최소가 된다.

#### 3.2. 저주파진동과 탐색기준

시계열 데이터에서 파라미터를 추정할 때, 잡음이 포함된 정도나 신호의 크기에 따라서 많은 모드가 계산될 수 있다. 그러므로 동조를 해석하기 위한 목적에 따라서 추정된 파라미터들을 적당하게 분리해야 한다. 이 논문에서는 전력계통의 안정도 측면에서 문제시 될 수 있는 광역 저주파진동 관

점에서 동조를 탐색한다. 따라서 광역 저주파진동에서 관심 있는 주파수 대역과 제동특성을 결정하고 이를 바탕으로 모드의 크기와 위상으로부터 동조를 탐색한다.

전력계통에서 저주파 진동은 주파수 0.2~2.0Hz 대역에서 발생하는 진동으로 고유치를 기반으로 한 선형해석에서는 지역모드와 광역모드로 구분하여 계통의 저주파진동을 해석한다[1,2]. 전 절에서 기술한 크기동조지표가 0에 근접할 때, 한 신호 그룹이 광역 진동을 지배하는데, 이 경우가 지역모드에 해당한다. 이러한 지역모드는 일부 지역 신호에서 모드 크기가 크게 추정되고, 다른 지역 신호에서는 작게 추정되거나 너무 작아서 추정되지 않을 수 있다. 반면에 광역모드는 전체 계통 신호에 진동이 포함되어 있고, 안정 운전을 하고 있는 계통에서는 비슷한 모드크기와 180° 근처의 위상차를 가지고 있다. 그러므로 지역모드에 대한 동조는 지역 신호들 사이에 +sync가 주요 관심 대상이고, 광역모드에 대한 동조는 지역과 지역 신호들 사이에 -sync가 주요 관심사항이다.

이 논문에서는 전력계통의 광역 저주파진동 관점에서 동조를 탐색하므로 광역 저주파진동 특성을 반영할 수 있도록 각 파라미터들의 범위를 설정하고 동조탐색기준을 제시한다. 먼저 주파수는 저주파 진동 해석에 적당한  $0.2\text{Hz} < f < 2.0\text{Hz}$ 의 주파수 범위를 선택하여 모드를 탐색한다. 그리고 계동계수의 특성을 반영하기 위하여 식 (8)로 표현되는 계동비가 10% 이하인 모드를 선택한다. 식 (8)에서  $\alpha$ 와  $\omega$ 는 각각 모드의 실수부와 허수부이다. 또한 선택된 모드들에서 계동계수 역수인 시정수가 2초 이상인 모드를 선택한다.

$$\zeta = -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \times 100 \quad (8)$$

그리고 상대적 모드크기는 주파수와 계동계수에 의해서 선택된 진동모드들의 크기 합으로 각 모드크기를 나눈 값으로 진동모드가  $n$ 개 선택되었다고 할 때, 식 (9)와 같이 정의한다. 상대적 모드크기는 신호에서 각 모드가 차지하는 상대적인 비중을 나타내는 것으로 모드의 중요성을 판단할 때, 하나의 기준이 될 수 있다. 주파수와 계동계수에 의해서 선택된 진동모드들 중에서 상대적 모드크기  $\%B_i$ 가 10% 이상인 모드들을 선택한다.

$$\%B_i = \frac{B_i}{\sum B} \times 100, \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

$$\sum B = \sum_{i=1}^n B_i \quad (10)$$

이 조건으로 전체 계통에서 발생하는 동조를 탐색할 수 있는데, 전술한 바와 같이 저주파 진동 측면에서 동조 탐색이 주 관심이므로 계통에서 발생하는 다른 진동문제는 관심 주파수나 계동계수의 영역을 변화해야 한다.

### 3.3. 실제적인 광역계통의 동조 탐색

이산신호에서 동조 탐색은 모든 데이터들이 동일한 시간으로 동기되어야 한다. 전력계통 해석을 위해서 일반적으로 사용하는 PSS/E나 EMTDC, TSAT과 같은 프로그램에서

출력된 결과는 시간동기 되어 있어 전체계통의 동조 탐색이 가능하지만, 실제계통에서는 동일 시간으로 동기 된 전체 계통의 데이터를 취득하는 것이 어렵다. 최근 국내에서도 시간 동기 장치인 iPIU를 개발하여 실제계통에 시험중에 있는데, 이를 전체 계통에 설비하기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요하다. 이 논문에서는 국부적으로 중요개소에 iPIU가 설치되었을 때, 광역 계통의 동조를 탐색할 수 있는 방법에 대해서 기술한다.

계통에서 취득한 전압과 전류로부터 유효전력을 계산하고, 이 유효전력으로부터 동조를 탐색한다고 하자. 이산신호인 유효전력에 포함된 파라미터들 중, 유효전력 크기와 관련된 변수는 모드크기이므로 이를 적당하게 정규화 함으로써 근사적으로 광역 동조를 탐색 할 수 있다. 그림 3은 광역계통도를 나타내고 있는데, 동일한 동적특성을 가진 발전기들을 하나의 지역으로 구분하였다. 지역 A에서 1번 발전기 모선에만 iPIU가 설치되어 있다면, 1번 발전기의 진동을 지역 A의 그룹 진동으로 환산할 수 있다. 만일 1번 발전기가 포함된 지역 A의 정상상태 유효전력 평균을  $P_g$ , 1번 발전기 정상상태 유효전력 평균을  $P_1$ 이라 하면, 그룹 A의 진동은  $P_g/P_1$ 을 곱하여 정규화 할 수 있다. 어떤 지역에  $n$ 개의 iPIU가 설치되어 있고, iPIU가 설치된 발전기의 출력을  $P_i$ 라 하면, 특정모드에 대한 정규화 된 모드크기  $B_{norm}$ 은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{norm} = \frac{P_g}{n} \left( \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{P_i} \right) \quad (11)$$

정규화 된 모드크기는 중요 개소에 설치된 몇 개의 iPIU에서 광역 진동을 근사적으로 파악할 수 있는 지역그룹 진동을 의미한다. 이 개념은 중요 변전소나 선로에서 취득한 변수를 대상으로 확장이 가능하기 때문에 다양한 계통 해석에 응용될 수 있다.

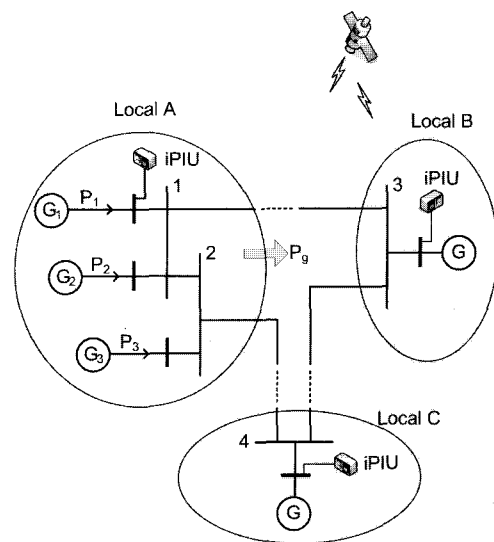


그림 3 광역 계통도  
Fig. 3 Diagram of Wide Area

만일 지역 A에 설치된 2기의 iPIU에서 취득한 유효전력에서 추정된 중요 모드크기와 위상이 각각  $B_1 \angle \theta_1$ 과  $B_2 \angle \theta_2$ 이라 하자. 그러면 새로운 그룹 신호의 위상은 식 (12)로부터 계산할 수 있고, n개의 신호에 대해서는 동일한 과정을 반복하여 그룹신호의 위상을 계산할 수 있다.

$$\phi_g = \tan^{-1} \left( \frac{B_1 \sin \theta_1 + B_2 \sin \theta_2}{B_1 \cos \theta_1 + B_2 \cos \theta_2} \right) \quad (12)$$

#### IV. 사례연구

전력계통에서 발생하는 저주파진동의 동조 탐색을 위해서 그림 4에 나타나 있는 두 지역계통[1]에 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 이 계통의 동적 변화에 의해서 동조가 어떻게 변화하는지 알아보기 위해서 두 지역의 부하 조건을 두 경우로 나누어서 시험하였다. Case 1은 지역 1의 부하와 지역 2의 부하가 각각 1367MW로 두 지역에 부하가 균등하여 연계선로에 작은 조류가 흐르고 있는 경우이다. Case 2는 총 부하가 Case 1과 같은 2734MW이나 지역 1의 부하가 지역 2의 부하보다 800MW 작은 경우이다. 이 경우는 지역 2의 부하량이 발전량보다 훨씬 커서 지역 1에서 지역 2로 송전선 7-9를 따라 많은 조류가 흐르고 있는 경우이다.

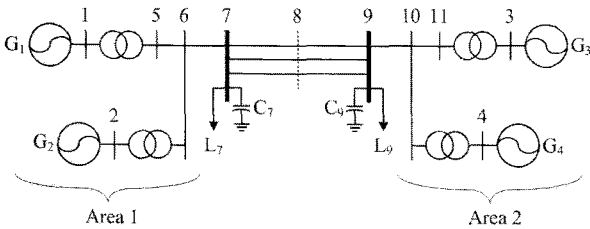


그림 4 두 지역 계통  
Fig. 4 Two-area systems

지금까지 저주파진동 문제는 주로 선형해석에 의하여 수행되었는데, 이 계통에 대한 선형해석 결과[2], 계통특성이 취약한 지역간 모드는 주파수 0.55Hz를 가지고 있는 모드로 지역1과 지역2가 서로 진동하고 있다.

그림 5는 선로 7-8에 3상단락고장을 모의한 후, 계산한 모든 발전기 출력들을 나타내고 있다. 각 발전기들이 고유한 동작점에서 서로 동조되어 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 5(a)는 Case 1의 경우로 발전기 G1-G2와 G3-G4는 각각 서로 +sync로 진동하고 있다. 그리고 지역 1과 지역 2 발전기 그룹은 서로 -sync로 진동하고 있어 동조현상이 전체 계통의 출력특성을 지배하고 있다. 이 경우에 전체 계통의 진동은 서로 상쇄되어 작다. 따라서 선로 7-8 고장에 대해서 전체계통은 안정하게 운전되고 있다. 그리고 보다 큰 외란에 대해서도 전체 계통은 안정하게 운전될 수 있음을 예상할 수 있다.

그림 5(b)는 Case 2의 경우로 같은 지역 내 발전기끼리 +sync로 진동하고 있으나 큰 선로 조류가 흐르면서 발전기 G3-G4 그룹의 출력이 전체 계통의 진동을 지배하고 있다. 이 경우는 지역 2가 전체 계통의 진동을 지배하고 있는 경

우로 이와 같은 계통은 작은 외란에 대해서도 쉽게 불안정하게 될 수 있다.

만일 Case 1과 같이 운전하고 있던 계통의 운전조건이 Case 2와 같이 변화하면, 동조 상태도 함께 변화한다. 즉 지역 1과 지역 2의 발전기 그룹이 -sync로 동조하여 운전하고 있는 상태에서 지역 2의 발전기 그룹이 전체계통의 진동을 지배하는 상태로 변화하여 동조파괴현상이 발생하였다.

그림 5에 나타난 신호에 Prony 법을 적용하여 파라미터를 추정된 결과, 그림 6과 같은 진동모드를 추정하였다. Case 1의 모드들은 모두 비슷한 값을 가지고 주파수 3.58(rad/s) 근처에 집중되어 있는 반면, Case 2의 모드들은 다소 차이가 있다. 이것은 Case 2의 모드들 중 G1,G2 관련 신호들의 크기가 작아서 상대적으로 큰 오차를 포함하고 있기 때문이다. 각 모드들에 대응하는 크기와 위상은 그림 7에 나타내었다. 신호의 크기와 유사하게 모드들의 크기도 계산되었음을 알 수 있다.

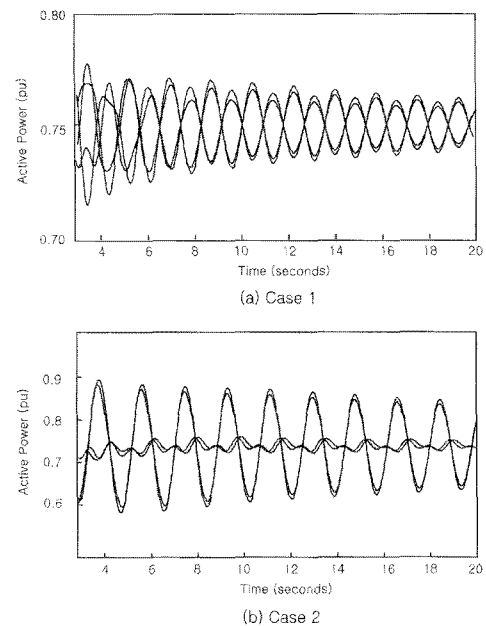


그림 5 발전기의 유효전력  
Fig. 5 Generator Active Power

Case 1에서 발전기 G1, G2는 위상  $36^\circ$  근처에서 +sync로 동조되어 있고, 발전기 G3, G4는 위상  $-145^\circ$  근처에서 +sync로 동조되어 있다. 그리고 지역 1과 지역 2 사이에 발전기 위상차는  $179^\circ$ 가 되어 -sync로 동조되어 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 7에 나타난 모드 크기에서도 확인할 수 있다. Case 2에서 발전기 G1, G2의 위상이 각각  $41^\circ$ 와  $75^\circ$ 를 가지고 있어 이들 발전기는 +sync로 동조되어 진동하고 있다. 그리고 발전기 G3, G4에서 모드 위상은 각각  $160^\circ$ 와  $153^\circ$ 를 가지고 두 신호가 +sync로 동조되어 진동하고 있다. 이 경우에 지역 1과 지역 2사이에 발전기 진동은 G3, G4가 지배하고 있는데, 그림 7(b)에 나타난 것과 같이 G3, G4의 크기가 매우 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

한편 Case 1에서 동조지표는  $0.846 \angle 181.6^\circ$ 로 계산되었다. 크기동조지표가 1에 근접하고 있어 두 신호그룹이 거의 같

은 크기로 진동하고 있고, 위상동조지표가  $180^\circ$  근처에 있어 두 신호가 정확하게 -sync로 진동하고 있음을 정량적으로 알 수 있다. Case 2에서 동조지표는  $0.07\angle -102.5^\circ$ 로 크기동조지표가 거의 0에 가까운 값을 가지고 있다. 이것은 한 지역 그룹의 진동이 광역진동을 지배하고 있음을 의미하고, 앞에서 기술한 바와 같이 이 경우에는 크기동조지표가 0에 근접하고 있으므로 광역 동조는 큰 의미가 없다. 이와 같은 계통은 광역진동이 매우 커서 작은 외란에 대해서 쉽게 계통이 불안정할 수 있으므로 광역 진동을 감소하거나 지역과 지역이 -sync가 되도록 제어기를 설계하거나 계통을 운용해야 한다.

두 지역계통의 예는 -sync로 동조되어 안정하게 운전 중인 광역계통이 계통 조건의 변화(부하 변화)로 인해서 -sync로 동조되지 않고, 특정지역 신호가 전체 계통진동을 지배하는 경우를 나타내고 있다. 운전조건이나 계통변화에 따라서 광역계통의 동조가 약화되거나 사라져 버리는 동조 파괴현상(sync breakdown phenomenon)이 발생할 수 있다. -sync로 동조되어 운전 중인 계통에서 동조파괴현상이 발생하면 광역진동은 커지고 작은 외란에도 쉽게 계통은 불안정해질 수 있다. 따라서 계통을 운용하거나 설계할 때, 동조파괴현상이 발생하지 않거나 최소가 되도록 운용하거나 계통을 설계해야 한다.

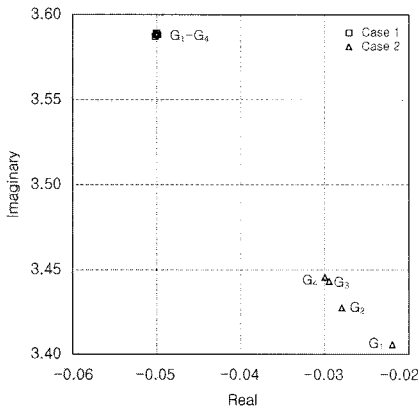


그림 6 시험계통의 모드  
Fig. 6 Modes of Test System

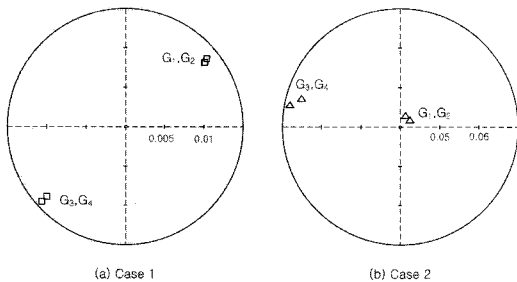


그림 7 모드들의 크기와 위상  
Fig. 7 Magnitude & Phase of Modes

입의 동적계통에서 동조 탐색은 동시성(시간)과 동일성(특성)을 기본 조건으로 한다. 제 4장에서 기술한 것과 같이 현재 iPIU나 네트워크에 대한 경제적, 기술적인 문제로 실

제 계통의 모든 발전기에서 시간동기 된 신호를 취득하는 것은 어렵다. 이 논문에서는 몇 기의 중요 개소에 iPIU가 설치되어 있을 때, 근사적으로 광역계통의 동조를 탐색할 수 있는 방법을 기술하고 있다.

만일 위에서 기술한 두 지역계통에서 모든 발전기의 유효전력을 취득하지 않고, 지역 1에서 발전기 G1과 지역 2에서 발전기 G3, G4의 유효전력을 취득하고, 파라미터를 추정하였다 하자. 이들 유효전력으로부터 광역계통의 동조 탐색은 식 (11)로 주어진 정규화한 모드크기로부터 얻을 수 있다. 표 1에는 Case 1에서 발전기 G1, G3, G4의 모드크기와 정상상태에서 그룹 발전기 출력, 그리고 정규화한 모드 크기를 나타내고 있다. 위상  $\phi_i$ 는 발전기 G1의 위상을 기준위상으로 설정하고 계산한 각 발전기의 위상차를 나타낸 것이다.

표 1에 나타난 정규화 된 모드 크기와 위상으로부터 동조지표를 계산한 결과,  $0.923\angle 181.2^\circ$ 를 얻었다. 모든 발전기 유효전력에서 계산한 동조지표와 다소 오차가 있으나 전체적인 결과는 유사함을 알 수 있다. 이러한 오차는 다가 계통에서 몇 기의 iPIU에서 취득한 정보를 이용하면 감소할 수 있다.

표 1 모드의 크기와 위상

Table 1 Magnitude & Phase of Modes

No.	$B_i$	$\phi_i$ (deg)	$P_i$ (MW)	$B_{norm}$	$\phi_g$ (deg)
G1	0.012	0.0	701.7	0.0060	0.0
G2	-	-	699.5		
G3	0.014	181.41	717.3	0.0065	181.26
G4	0.012	181.09	701.4		

V. 결 과

지금까지 전력계통에서 발생하는 동조탐색 방법과 실제에 적용할 수 있는 정규화한 모드 크기를 이용한 동조 탐색 방법, 그리고 계통환경 변화에 따른 광역 계통의 동조가 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 이 논문에서는 동조 탐색으로부터 광역계통의 저주파진동특성을 해석할 수 있음을 보였는데 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 전력계통에 저주파진동이 발생하였을 때, 지역발전기 들끼리는 서로 +sync로 동조하고, 지역과 지역은 서로 -sync로 동조한다. 지역발전기들이 +sync로 동조하는 것은 전력계통이 병렬로 연결되어 있고, 항상 계통 전체부하가 지역발전량보다 크기 때문이다.

(2) 지역과 지역이 -sync로 동조되어 안정하게 운전 중인 계통에서 신규 전력 설비 증설, 연쇄적인 선로/부하 탈락, 연속적인 제어기 오동작 등으로 계통구조가 변화해서 -sync가 약화되거나 사라지면, 동조파괴현상이 발생한다. 이것은 특정지역이 전체계통의 진동을 지배하여 광역진동이 커지고 따라서 작은 외란에도 계통은 불안정할 수 있다. 두 지역 계통에서 지역 1과 지역 2가 균등하게 부하를 가지고 있는 Case1과 같은 계통이 Case2와 같이 변화하면, 일부지역 진동이 전체계통의 진동을 좌우하여 작은 외란에도 계통은 쉽

계 불안정할 수 있다. 따라서 저주파진동의 동조탐색으로부터 광역 진동을 파악하면 광역계통의 안정도 여유를 판단할 수 있다.

(3) 지역그룹 진동을 의미하는 정규화 된 모드크기는 중요개소에 설치된 iPIU로부터 광역계통의 진동을 근사적으로 해석할 수 있다. 이 개념은 중요 변전소나 선로에서 취득한 변수를 대상으로 확장이 가능하기 때문에 다양한 계통 해석에 적용될 수 있다.

대규모 전력계통에서 지속적인 진동은 광역정전을 일으킬 수 있는 잠재적인 요인이기 때문에 진동문제는 계통운용 측면에서 중요하다. 전력계통에서 저주파 진동에 대한 동조를 탐색함으로써 대규모 정전을 일으킬 수 있는 잠재적인 원인을 파악할 수 있다.

### VI. 결 론

전력계통은 일정주파수로 동기 되어 부하에 전력을 공급 하는데, 제동특성이 취약한 계통에서 외란이 발생하였을 때, 저주파진동이 발생한다. 전력계통에서 발생하는 진동은 일정한 주파수로 서로 동조되는데, 이 논문에서는 이와 같이 전력계통에서 발생하는 동조를 탐색하는 방법과 그 결과에 대해서 기술하고 있다. 광역 신호들 사이에 동조를 탐색하기 위해서 계통에서 취득한 신호에 파라미터 추정방법을 적용하여 중요 모드와 크기 및 위상을 추정하고 이들을 비교하여 광역 신호들 사이에 동조를 탐색하였다. 추정된 파라미터에서 비슷한 주파수와 제동계수를 갖는 모드를 선택하고 이들의 크기와 위상으로부터 광역계통의 동조를 보다 정량적으로 판단할 수 있는 동조지표를 계산하였다. 동일한 특성을 갖는 신호의 동조를 파악함으로써 발전기와 부하 특성을 구분할 수 있고, 광역지표로부터 안정도 여유를 추정할 수 있다. 몇 개의 중요개소에 설치된 iPIU에서 취득한 데이터를 이용해서 광역동조를 해석할 수 있도록 정규화 된 모드크기를 이용한 동조탐색법을 제안하였다.

이 논문에서 제안한 동조 탐색 방법과 동조지수를 두 지역계통에 적용하여 계통에서 취득한 이산신호에서도 동조를 탐색할 수 있음을 검증하였다.

### 참 고 문 헌

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.  
 [2] M. Klein, G. J. Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, pp.914-921, Aug. 1991.  
 [3] A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, Synchronization : A Universal Concept in Nonlinear Sciences, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.  
 [4] Steven H. Strogatz, Sync : The Emerging Science of Spontaneous Order, Hyperion Books, New York, 2003  
 [5] Steven H. Strogatz, "Exploring Complex Networks", Nature, Vol. 410, pp 268-276, 2001.

[6] K. S. Shim, H. K. Nam "A Sync Phenomenon in Power Systems," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 55A, No. 4, pp.163-171, Apr. 2006.  
 [7] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, K. E. Martin, J. W. Burns, H. Lee, J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, "Use of the WECC WAMS in Wide-Area Probing Tests for Validation of System Performance and Modeling", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp.250-257, Feb. 2009.  
 [8] IEEE Std C37.118TM-2005, "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems", IEEE, 2005.  
 [9] 박경원, 장수형, 김영돈, 이진, 최종용, 노기환, 안정길, "광역계통 감시제어를 위한 동기페이저 측정 기기의 제작", 대한전기학회지, Vol.57, No.4, pp.40-46, 2008.  
 [10] 김지영, 김상태, 유남철, 이동철, "한국형 광역 전력계통 감시를 위한 상위 인프라 시스템", 대한전기학회지, Vol. 57, No.4, pp.33-39, 2008.  
 [11] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, pp.80-89, Feb. 1990.  
 [12] L. L. Scharf, Statistical Signal Processing : Detection, Estimation, and Time Series Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1991.

## 저 자 소 개



### 심 관 식 (沈 冠 植)

1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업.  
 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
 1997년~2004년 서남대 전기전자공학과 조교수  
 Tel : 062-530-3920, Fax : 062-530-3919  
 E-mail : simgong@ieee.org



### 남 해 곤 (南 海 鯤)

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업.  
 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사).  
 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(박사).  
 1975년-1978년 한국전력 원자력 건설부 근무.  
 1986년-1988년 한국전기연구소 근무.  
 1988년-현재 전남대 전기공학과 교수  
 Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749  
 E-mail : hknam@chonnam.ac.kr



**김 용 구 (金 容 九)**

1995년 전남대학교 전기공학과 공학사.  
1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)  
2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사)  
2004년~현재 한국폴리텍 V대학 전기계  
측제어과 조교수.

E-mail : kimyg69@hanmail.net



**문 영 환 (文 英 煥)**

1979년 서울공대 전기공학과 졸업. 1990  
년 U. of Texas at Arlington 졸업 (박  
사), 1981년~현재 한국전기연구원 Smart  
Grid 연구센터장. 대한전기학회 시니어회  
원 및 홍보이사. 기술개발 분야는 발전기  
안정도 해석용 수리모형 개발과 동특성  
시험기술, 전력계통안정화장치 (PSS) 튜  
닝기술, Synchrophasor 기반 전력계통  
감시제어 기술.

Tel : 031-420-6030

E-mail: yhmoon@keri.re.kr



**김 상 태 (金 尙 泰)**

1996년 명지대학교 전기공학과 졸업.  
1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).  
2003년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).  
현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 송변전  
IT연구그룹 선임연구원. 대한전기학회 국  
제위원. 관심분야는 Synchro-Phasor기반  
전력계통 감시제어 기법, 디지털 보호계  
전기 및 정정협조기술, 신호처리기술.

Tel : 031-420-0751

E-mail : jesteka@kdn.com